

ANALYSIS INFLUENCES OF MEASUREMENT DATA ON POWER SYSTEM STATE ESTIMATION ACCURACY USING WEIGHTED LEAST SQUARES METHOD

Vu Van Chien*, Nguyen Ngoc Tuan, Ngo Viet Cuong, Nguyen Van Tien

Institute of Missile and Control Engineering - Military Technical Academy

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	31/3/2025	The Weighted Least Squares method is widely used in power system state estimation problems. This paper analyzes the impact of measurement data on the convergence behavior and accuracy of the method. MATLAB software with the MATPOWER module is employed to validate the analysis on 30-bus and 69-bus power grids. The results demonstrate that the number, type, and placement of measurements significantly influence algorithm convergence, while the accuracy of these devices and their associated weight values strongly affect estimation quality. The study also reveals that assigning weights based on measurement error yields good results but does not fully exploit the optimal solution space. The paper proposes a future research direction involving adaptive weighting in the Weighted Least Squares framework to enhance estimation accuracy, support the development of efficient measurement systems, and expand its applicability in monitoring and operating modern power grids.
Revised:	14/6/2025	
Published:	15/6/2025	
KEYWORDS		
Energy management		
State estimation		
Power system analysis		
Weighted Least Squares		
Matpower		

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG DỮ LIỆU ĐO ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI HỆ THỐNG ĐIỆN SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU CÓ TRỌNG SỐ

Vũ Văn Chiến*, Nguyễn Ngọc Tuấn, Ngô Việt Cường, Nguyễn Văn Tiến

Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển - Học viện Kỹ thuật quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	31/3/2025	Phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số được sử dụng phổ biến trong bài toán ước lượng trạng thái hệ thống điện. Bài báo phân tích ảnh hưởng của dữ liệu đo đến khả năng hội tụ và tính chính xác của phương pháp ước lượng. Phần mềm Matlab, mô-đun Matpower được sử dụng để kiểm chứng phân tích trên hai lưới điện 30 nút và 69 nút. Kết quả tính toán cho thấy: số lượng phép đo, loại phép đo và vị trí phép đo ảnh hưởng đến khả năng hội tụ của thuật toán; độ chính xác của thiết bị đo lường và giá trị trọng số tương ứng với từng phép đo ảnh hưởng lớn đến chất lượng ước lượng trạng thái. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, việc gán trọng số dựa trên sai số của thiết bị đo mang lại kết quả tốt, nhưng vẫn chưa khai thác hết không gian nghiệm tối ưu. Bài báo đề xuất hướng nghiên cứu mở rộng sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu với trọng số thích nghi nhằm nâng cao độ chính xác ước lượng, hỗ trợ xây dựng hệ thống đo lường hiệu quả và mở rộng ứng dụng trong giám sát, điều hành lưới điện hiện đại.
Ngày hoàn thiện:	14/6/2025	
Ngày đăng:	15/6/2025	
TỪ KHÓA		
Quản lý năng lượng		
Ước lượng trạng thái		
Phân tích hệ thống điện		
Bình phương cực tiểu có trọng số		
Matpower		

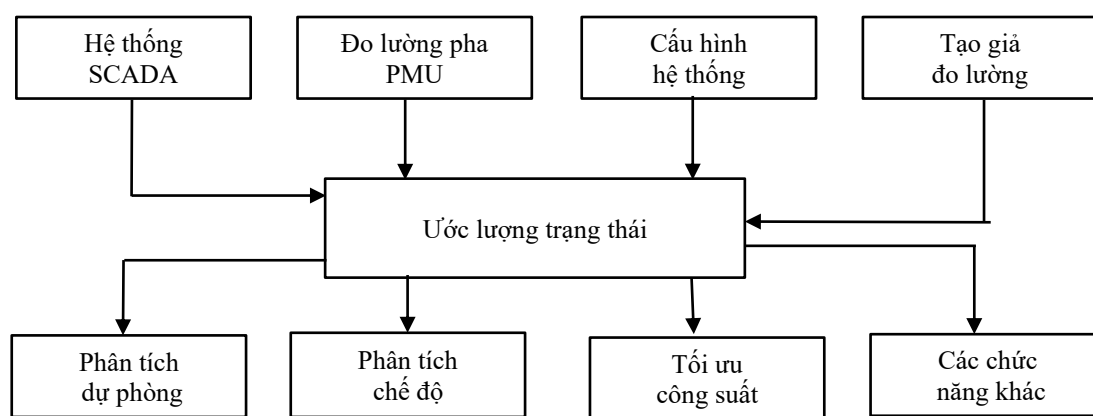
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12439>

* Corresponding author. Email: chienvuvan@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

Ước lượng trạng thái (SE) hệ thống điện được giới thiệu lần đầu tiên bởi Fred Schweppes vào năm 1970 [1]. Ngày nay nó đã trở thành một chức năng quan trọng trong hệ thống quản lý năng lượng (EMS) của lưới điện truyền tải và hệ thống quản lý phân phối (DMS) của lưới điện phân phối. Kết quả tính toán thu được từ SE cung cấp cho các ứng dụng khác của EMS như: tính toán dự phòng, phân tích chế độ và tối ưu hóa công suất. Trong DMS, SE là nền tảng cho các ứng dụng như: phân tích sự cố phân phối, tái cấu trúc mạng lưới tối ưu, xác định và khôi phục sự cố, điều khiển điện áp và công suất phản kháng [2]. Vị trí và vai trò của SE trong hệ thống EMS được thể hiện trong Hình 1.

Các phương pháp ước lượng trạng thái phổ biến hiện nay chủ yếu bao gồm: phương pháp bình phương cực tiểu có trọng số (WLS), phương pháp ước lượng trạng thái bền vững (RSE) và các phương pháp trí tuệ nhân tạo như thuật toán bầy đàn (PSO), thuật toán bầy kiến (ACO), v.v.



Hình 1. Vai trò của SE trong hệ thống EMS

Phương pháp WLS nhạy cảm hơn với nhiễu đo lường, nhưng ưu điểm là tính toán đơn giản, hội tụ nhanh khi dữ liệu đủ tốt và phù hợp với nhiều loại phép đo khác nhau, đặc biệt với dữ liệu có phân phối chuẩn nên được áp dụng phổ biến trong các bộ ước lượng trạng thái [3]. Sự khác nhau về việc sử dụng WLS trong lưới điện phân phối và lưới điện truyền tải được thể hiện trong [4]. Trong lưới điện truyền tải, biến trạng thái thường được sử dụng là biên độ và góc pha điện áp, trong khi đó ở lưới điện phân phối, biến trạng thái có thể là biên độ và góc pha dòng điện hoặc biên độ và góc pha điện áp [3]. Nghiên cứu [5] đã phân tích và so sánh kết quả ước lượng trạng thái khi sử dụng các biến trạng thái khác nhau. Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng, với lưới điện phân phối sử dụng biến trạng thái là điện áp-góc pha có độ chính xác ước lượng cao hơn không quá nhiều so với sử dụng biến trạng thái là dòng điện nhánh-góc pha. Ngoài ra, WLS còn cho kết quả ước lượng tốt khi thực hiện bài toán ước lượng lưới điện một pha hoặc lưới điện ba pha không cân bằng [6].

Bên cạnh việc sử dụng thuật toán ước lượng trạng thái, độ chính xác của quá trình ước lượng còn phụ thuộc vào dữ liệu đo lường. Dữ liệu đo này được cung cấp bởi hệ thống thu thập dữ liệu và điều khiển giám sát (SCADA), bộ đo lường pha (PMUs), hay hạ tầng đo đếm tiên tiến (AMI). Các thiết bị đo này có sai số đo khác nhau theo từng loại phép đo. Hệ thống SCADA cung cấp các phép đo về công suất (công suất tác dụng và công suất phản kháng) tại các nút và trên các nhánh, biên độ điện áp tại các nút và biên độ dòng điện trên các nhánh. Sai số lớn nhất của phép đo biên độ điện áp là 2%, của phép đo công suất là 3%. PMUs cung cấp giá trị đo lường pha điện áp và pha dòng điện với sai số lớn nhất 0,5% về biên độ và 10^{-2} rad về góc pha [7]. Hệ thống đo lường AMI cung cấp các phép đo về công suất, biên độ điện áp với sai số lớn nhất là 10%. Giả định rằng sai số của các phép đo được phân phối theo tiêu chuẩn Gauss với độ lệch chuẩn được tính bằng một phần ba giá trị sai số lớn nhất [5], [8]. Những giá trị sai số này sẽ làm cơ sở để tính trọng số cho các phép đo ở phần sau.

Các tác giả trong [9] cũng đã sử dụng mạng điện truyền tải 3 nút và 14 nút để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố như số lượng phép đo, loại phép đo và trọng số phép đo đến kết quả ước lượng các biến trạng thái. Tuy nhiên, những phân tích này chưa được áp dụng trên mô hình lưới điện phân phối, chưa thấy được cơ sở lý thuyết rõ ràng cho việc lựa chọn trọng số, cũng như chưa chỉ ra được ảnh hưởng của sai số đo lường đến kết quả ước lượng trạng thái.

Nhằm bù đắp những khoảng trống này, trong nghiên cứu này tác giả tiếp tục sử dụng phương pháp WLS để phân tích sâu sắc hơn về ảnh hưởng của dữ liệu đo đến chất lượng ước lượng trạng thái. Hai loại lưới điện điển hình là lưới điện truyền tải 30 nút và lưới điện phân phối 69 nút được sử dụng để tiến hành mô tả, tính toán, phân tích cụ thể cách thức mà dữ liệu ảnh hưởng đến độ chính xác của phương pháp WLS. Những nội dung còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần 2 trình bày nội dung cơ bản của phương pháp WLS để ước lượng trạng thái hệ thống điện, phần 3 phân tích ảnh hưởng các yếu tố đến ước lượng trạng thái với lưới điện 30 nút và 69 nút, phần 4 đưa ra một số kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Ước lượng trạng thái hệ thống điện bằng phương pháp WLS

Các phương trình ước lượng trạng thái hệ thống điện được thể hiện như sau [10]:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (4)$$

Trong đó:

Phương trình (1), (2) tính công suất tại nút i . Phương trình (3), (4) tính công suất tác dụng nhánh và phản kháng nhánh từ nút i tới nút j .

V_i, θ_i là biên độ và góc pha điện áp tại nút i . V_j, θ_j là biên độ và góc pha điện áp tại nút j .

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ là sai lệch góc pha điện áp nút i và nút j .

$G_{ij} + jB_{ij}$ là dạng phức của phân tử thứ ij trong ma trận tổng dẫn.

$g_{ij} + jb_{ij}$ là tổng dẫn nhánh ij , kết nối nút i và nút j .

$g_{si} + jb_{si}$ là tổng dẫn nhánh shunt nối với nút i .

Phương trình tổng quát của ước lượng trạng thái hệ thống điện được trình bày như sau:

$$z = h(x) + e \quad (5)$$

Trong đó: $z^T = [z_1, z_2, \dots, z_m]$ là vector đo lường của hệ thống; $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ là vector trạng thái hệ thống; $h^T(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$ là tập hợp các hàm phi tuyến theo biến trạng thái x ; $e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ là vector sai số đo lường.

Trạng thái hệ thống thu được bằng cách giải bài toán tối ưu sau:

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{[z_i - h_i(x)]^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T \cdot W \cdot [z - h(x)] \quad (6)$$

Ở đây, $W = R^{-1}$ gọi là ma trận trọng số, có các thành phần đường chéo: $w_i = \frac{1}{R_i} = \frac{1}{\sigma_i^2}$.

Với σ_i là độ lệch chuẩn của phép đo thứ i , được tính theo độ chính xác của thiết bị đo tương ứng.

Phương trình (6) được giải bằng phương pháp WLS, do giới hạn về số trang của bản thảo nên chúng tôi sẽ không trình bày chi tiết tại đây, phương pháp WLS có thể được tham khảo tại [10].

3. Phân tích kết quả

Kết quả của các trường hợp khảo sát được thực hiện trên phần mềm Matlab R2024a, với module Matpower 8.0; máy tính cá nhân với cấu hình Intel(R) Core(TM) i5-8350U, 1,90 GHz, ram 8G. Dữ liệu đo lường lấy từ kết quả tính toán dòng công suất bằng phương pháp Newton Raphson; sau đó được thêm vào một lượng tương ứng với sai số lớn nhất của từng loại thiết bị đo. Trong mỗi trường hợp dữ liệu đo gồm: phép đo biên độ điện áp nút thứ i (V_i), cặp phép đo công suất tác dụng và công suất phản kháng nút thứ i (PQ_i), cặp phép đo công suất tác dụng và công suất phản kháng nhánh từ nút i đến nút j (PQ_{ij}).

Theo tài liệu [5], các phép đo được giả định có phân bố theo chuẩn phân bố Gauss với độ lệch chuẩn bằng một phần ba độ chính xác, do đó, ta có công thức tính độ lệch chuẩn dựa trên sai số lớn nhất của phép đo như sau:

$$\sigma_i = \frac{\Delta_{i\max}}{3} \quad (7)$$

Với $\Delta_{i\max}$ là % sai số lớn nhất của phép đo thứ i . Trọng số của phép đo thứ i được tính theo biểu thức sau:

$$w_i = \frac{1}{R_i} = \frac{1}{\sigma_i^2} = \frac{9}{\Delta_{i\max}^2} \quad (8)$$

Để so sánh độ chính xác ước lượng trạng thái của các trường hợp khảo sát, ta sử dụng giá trị sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE), được mô tả bởi biểu thức sau:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \cdot 100\% \quad (9)$$

Trong đó: A_t là giá trị đúng hay giá trị được tính toán theo phương pháp Newton Raphson bằng phần mềm Matlab. F_t là giá trị ước lượng trạng thái. Giá trị MAPE càng nhỏ thì quá trình ước lượng có độ chính xác càng cao.

Hệ số thặng dư (ký hiệu là η) phản ánh mức độ dư thừa dữ liệu, cũng được phân tích trong các trường hợp khảo sát của bài báo. Đây là một chỉ số quan trọng đánh giá mức độ đủ và phân bố hợp lý của các phép đo trong hệ thống điện đối với bài toán ước lượng trạng thái. Nó biểu thị mối liên hệ giữa số lượng phép đo và số lượng biến trạng thái cần ước lượng trong hệ thống, được tính bằng công thức sau:

$$\eta = \frac{m}{2N-1} \quad (10)$$

Trong đó: m là số lượng các phép đo; N là số nút của hệ thống; $(2N-1)$ là số biến trạng thái cần ước lượng.

3.1. Lưới điện 30 nút

Đây là lưới điện truyền tải gồm có 30 nút, 41 nhánh, 6 máy phát, 24 phụ tải, 4 máy biến áp và 2 nhánh shunt. Sơ đồ một sợi và thông tin chi tiết về lưới điện này tham khảo tài liệu [11].

3.1.1. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí phép đo

Giả sử dữ liệu đo được thu thập từ hệ thống SCADA với sai số lần lượt là: 2% đối với phép đo V_i , 3% với phép đo PQ_i và PQ_{ij} . Vị trí đo lường cụ thể được trình bày trong tài liệu bổ sung trên link <https://bitly.li/SVG4>. Từ kết quả các trường hợp khảo sát được trình bày trong Bảng 1, ta rút ra những nhận xét sau:

- Trong tất cả các trường hợp, khi số lượng phép đo nhỏ hơn 59, ứng với giá trị $\eta < 1$ thì thuật

toán không hội tụ. Hệ thống không đảm bảo điều kiện quan sát nên bài toán ước lượng không thực hiện được.

- Số lượng phép đo nhỏ nhất thỏa mãn điều kiện hội tụ của thuật toán là 59 (ứng với $\eta = 1$), cấu hình dữ liệu đo cụ thể gồm: 1 phép đo biên độ điện áp, 29 phép đo công suất tác dụng và phản kháng nút (Trường hợp 2).

Bảng 1. Kết quả ước lượng trạng thái lưới điện 30 nút với nguồn dữ liệu từ hệ thống SCADA

TT	Số lượng phép đo	Hệ số η	MAPE V_i (%)	MAPE θ_i (%)	Số lần lặp
Trường hợp 1	49	0,83	Không hội tụ		
Trường hợp 2	59	1,0	2,1885	1,0804	5
Trường hợp 3	83	1,4	1,956	0,8801	6
Trường hợp 4	83	1,4	Không hội tụ		
Trường hợp 5	95	1,61	1,982	0,92	6
Trường hợp 6	110	1,86	Không hội tụ		
Trường hợp 7	110	1,86	2,011	0,933	8

- Khi số lượng phép đo càng lớn ($\eta > 1$) thì khả năng quan sát hệ thống càng được đảm bảo, thuật toán càng đảm bảo độ hội tụ và tính toán ra kết quả ước lượng trạng thái. Nhưng điều này không phải lúc nào cũng đúng, cụ thể trong các trường hợp sau:

+ Trường hợp 3 và trường hợp 4 với cùng số lượng phép đo là 83, nhưng số lượng các phép đo điện áp và công suất nút là khác nhau. Trường hợp 3 cho kết quả ước lượng tốt nhưng trường hợp 4 không đảm bảo hội tụ. Điều này chứng tỏ, kết quả ước lượng trạng thái phụ thuộc vào từng loại phép đo.

+ Trường hợp 6 và trường hợp 7 với cùng số lượng phép đo là 110, số lượng các phép đo của mỗi loại là như nhau, nhưng trường hợp 7 đảm bảo khả năng hội tụ, trường hợp 6 thì không. Điều này chứng tỏ quá trình ước lượng trạng thái còn phụ thuộc vào vị trí đặt phép đo của từng loại.

3.1.2. Ảnh hưởng của trọng số phép đo

Phần này khảo sát sự thay đổi kết quả ước lượng trạng thái trên một cấu hình dữ liệu đo nhưng được lấy từ các thiết bị đo khác nhau. Cấu hình đo và kết quả ước lượng trạng thái với sự khác nhau của thiết bị đo được thể hiện trên Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả ước lượng trạng thái với trọng số khác nhau của lưới điện 30 nút

TT	Phép đo biên độ điện áp tại các nút: 1, 5, 10, 25 Phép đo công suất nút tại: 1, 2, ..., 30 Phép đo công suất nhánh trên: 1-3; 2-6; 12-14; 23-15					
	Sai số	Trọng số	MAPE	MAPE	Số lần	Thời gian
	$[V_i; PQ_i; PQ_{ij}]$	$[V_i; PQ_i; PQ_{ij}]$	V_i (%)	θ_i (%)	lặp	(ms)
Trường hợp 1A	10%; 10%; 10%	9e+2; 9e+2; 9e+2	9,70	8,26	6	16
Trường hợp 1B	2%; 3%; 3%	2,25e+4; 1e+4; 1e+4	1,985	0,942	6	12
Trường hợp 1C	0,5%; 3%; 3%	3,6e+5; 1e+4; 1e+4	0,507	1,89	7	54
Trường hợp 1D	0,5%; 0,5%; 0,5%	3,6e+5; 3,6e+5; 3,6e+5	0,485	0,451	6	12

Từ dữ liệu Bảng 2 ta rút ra những nhận xét như sau:

- Trường hợp 1A: Sử dụng hệ thống AMI với sai số lớn (10% cho cả phép đo biên độ điện áp và các phép đo công suất), chất lượng dữ liệu đầu vào có độ chính xác thấp, nên kết quả ước lượng trạng thái có sai lệch lớn nhất: 9,7% với biên độ điện áp và 8,26% với góc pha.

- Trường hợp 1B: Sử dụng hệ thống SCADA (Sai số của phép đo V_i là 2%; phép đo công suất là 3%); trọng số lúc này lớn hơn và kết quả ước lượng trạng thái tốt hơn so với trường hợp 1A. Cụ thể là sai số biên độ điện áp giảm xuống còn 1,985%, góc pha giảm còn 0,942%.

- Trường hợp 1C: Phép đo biên độ điện áp được thực hiện bởi PMUs với sai số là 0,5%; phép đo công suất được lấy từ hệ thống SCADA với sai số là 3%. Kết quả ước lượng biên độ điện áp thu được tốt hơn nhiều so với trường hợp 1B; nhưng sai số góc pha điện áp tăng lên so với trường hợp 1B.

- Trường hợp 1D: Dữ liệu đo lường được lấy hoàn toàn từ PMUs, kết quả ước lượng trong trường hợp này có độ chính xác cao nhất, điện áp tại các nút có sai lệch 0,485% về biên độ và 0,451% về góc pha.

3.2. Lưới điện 69 nút

Đây là lưới điện phân phối hình tia, có 69 nút và 68 nhánh, không có máy biến áp và nhánh shunt. Sơ đồ một sợi và các thông số lưới điện tham khảo tài liệu [12] và Matpower.

3.2.1. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí phép đo

Cấu hình chi tiết bộ dữ liệu đo lường được mô tả trong tài liệu bổ sung trên link <https://bitly.li/SVG4> và kết quả ước lượng trạng thái được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả ước lượng trạng thái lưới điện 69 nút với nguồn dữ liệu từ hệ thống SCADA

TT	Số lượng phép đo	Hệ số η	MAPE V_i (%)	MAPE θ_i (%)	Số lần lặp
Trường hợp 8	137	1,0	2,031	1,015	4
Trường hợp 9	150	1,095		<i>Không hội tụ</i>	
Trường hợp 10	150	1,095	2,0097	0,9738	4
Trường hợp 11	185	1,350	1,9989	1,0532	5
Trường hợp 12	231	1,686	1,9978	0,9630	7
Trường hợp 13	231	1,686		<i>Không hội tụ</i>	

Kết quả trên Bảng 3 cho thấy:

- Cũng giống với lưới điện 30 nút, thuật toán WLS cho lưới điện phân phối 69 nút chỉ có thể hội tụ khi hệ số thẳng dư $\eta \geq 1$. Khi $\eta = 1$, thuật toán chỉ có thể đạt được sự hội tụ với kiểu cấu hình dữ liệu đo gồm: 01 phép đo biên độ điện áp và 68 cặp phép đo công suất tại các nút, như kết quả ở trường hợp 8.

- Trường hợp 9 và trường hợp 10, với số lượng phép đo đều bằng 150, nhưng số lượng phép đo P_i , Q_i và P_{ij} , Q_{ij} trong mỗi trường hợp là khác nhau, dẫn đến kết quả ước lượng khác nhau (Trường hợp 9 không hội tụ). Điều này cho thấy, kết quả ước lượng trạng thái phụ thuộc vào số lượng từng loại phép đo và vị trí của chúng trong lưới điện.

- Trường hợp 13: khi số lượng phép đo tăng lên 231 ($\eta = 1,686$), thuật toán vẫn không hội tụ, nhưng khi thay đổi vị trí đo của mỗi loại (trường hợp 12), vẫn giữ nguyên số lượng phép đo thì hệ thống lại trở nên quan sát được và thuật toán WLS cho kết quả tốt hơn so với các trường hợp có số lượng phép đo ít hơn.

3.2.2. Ảnh hưởng của trọng số phép đo

Tương tự như lưới điện 30 nút, bộ dữ liệu khảo sát và trọng số của các phép đo được cung cấp bởi các nguồn khác nhau được thể hiện trên Bảng 4. Theo kết quả Bảng 4, ta có nhận xét sau:

- Trường hợp 2A: Sử dụng bộ đo lường AMI với sai số lớn nhất là 10%, dữ liệu đầu vào có độ chính xác không cao, độ lệch chuẩn lớn, phương sai lớn, trọng số nhỏ. Kết quả ước lượng có sai lệch lớn: 9,982% về biên độ điện áp và 8,919% về góc pha.

- Trường hợp 2B: Sử dụng hệ thống SCADA để thu thập dữ liệu, sai số đo giảm xuống (2% với phép đo biên độ điện áp, 3% với phép đo công suất), tương ứng với đó là trọng số tăng so với trường hợp sử dụng dữ liệu từ AMI, kết quả ước lượng trạng thái tốt hơn. Ước lượng có sai lệch về biên độ điện áp giảm còn 1,998%, góc pha giảm còn 1,053%.

- Trường hợp 2D: Sử dụng thiết bị PMUs để thực hiện các phép đo với sai số là 0,5%, dữ liệu thu được có độ chính xác cao nhất, trọng số của các phép đo tương ứng có giá trị lớn nhất, kết quả ước lượng trong trường hợp này có độ chính xác cao nhất, sai lệch 0,499% về biên độ và 0,503% về góc pha.

Bảng 4. Kết quả ước lượng trạng thái với trọng số khác nhau của lưới điện 69 nút

TT	Phép đo biên độ điện áp tại các nút: 1; 3; 8; 11; 12; 20; 60 Phép đo công suất nút tại: 1, 2, ..., 69 Phép đo công suất nhánh trên: 1-2; 3-36; 12-13; 53-54; 23-24; 61-62; 32-33; 44-45					
	Sai số	Trọng số	MAPE	MAPE	Số lần	Thời gian
	$[V_i, PQ_i, PQ_{ij}]$	$[V_i, PQ_i, PQ_{ij}]$	$V_i (\%)$	$\theta_i (\%)$	lặp	(ms)
Trường hợp 2A	10%, 10%, 10%	9e+2; 9e+2; 9e+2	9,982	8,919	6	22
Trường hợp 2B	2%, 3%, 3%	2,25e+4; 1e+4; 1e+4	1,998	1,053	5	16
Trường hợp 2C	0,5%, 3%, 3%	3,6e+5; 1e+4; 1e+4	0,492	4,064	7	49
Trường hợp 2D	0,5%; 0,5%; 0,5%	3,6e+5; 3,6e+5; 3,6e+5	0,499	0,503	5	36

Với cả hai lưới điện 30 nút và 69 nút, ta nhận thấy rằng:

- Trong tất cả các trường hợp khảo sát, khi trọng số của các phép đo có giá trị bằng nhau thì kết quả ước lượng trạng thái không thay đổi.

- Trong các trường hợp khảo sát ở trên, trọng số ảnh hưởng đến cả số lần lặp và thời gian tính toán của WLS, mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào cách trọng số tác động đến quá trình hội tụ của thuật toán. Nhìn chung, số lần lặp dao động từ 5-8 lần, hệ thống càng lớn, số lượng phép toán càng nhiều thì thời gian tính toán càng tăng.

- Nghiên cứu đã tiến hành khảo sát với các giá trị trọng số khác so với giá trị trọng số được tính theo công thức (8) bằng cách giữ nguyên cấu hình đo lường và sai số phép đo. Một số ít trường hợp được liệt kê trong Bảng 5 cho thấy vẫn có những giá trị trọng số cho kết quả ước lượng tốt hơn. Cụ thể với lưới điện 30 nút thì kết quả ước lượng trường hợp 14 tốt hơn trường hợp 1A, trường hợp 15 tốt hơn trường hợp 2A. Với lưới điện 69 nút, trường hợp 16 cho kết quả ước lượng tốt hơn trường hợp 2A. Do đó, hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo là tìm ra một giải pháp xác định giá trị trọng số để kết quả ước lượng trạng thái đạt độ chính xác cao nhất.

Bảng 5. Kết quả ước lượng trạng thái với giá trị trọng số khác so với lý thuyết

TT	Loại lưới điện	Sai số	Trọng số	MAPE	MAPE
		$[V_i, PQ_i, PQ_{ij}]$	$[V_i, PQ_i, PQ_{ij}]$	$V_i (\%)$	$\theta_i (\%)$
Trường hợp 14	30 nút	[10%, 10%, 10%]	[1e+2, 1e+5, 1e+5]	4,965	0,154
Trường hợp 15	30 nút	[2%, 3%, 3%]	[1e+6, 1e+6, 1e+4]	1,971	0,915
Trường hợp 16	69 nút	[10%, 10%, 10%]	[1e+2, 1e+5, 1e+5]	9,905	8,499

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả của phương pháp WLS trong ước lượng trạng thái hệ thống điện, thông qua các thử nghiệm trên lưới 30 nút và 69 nút. Việc gia tăng mật độ phép đo giúp cải thiện rõ rệt khả năng quan sát và tốc độ hội tụ. Tuy nhiên, hiệu quả chung vẫn phụ thuộc mạnh vào vị trí lắp đặt và loại phép đo được sử dụng. Phân tích cho thấy việc gán trọng số dựa đơn thuần trên phương sai nhiều đo chưa tận dụng đầy đủ tiềm năng của không gian nghiệm. Vì vậy, hướng phát triển tiếp theo là xây dựng các chiến lược tối ưu hóa trọng số theo thời gian thực, thích nghi với đặc tính dữ liệu và cấu trúc mạng lưới. Việc tích hợp các thuật toán meta-heuristic như GA, PSO hoặc học máy sẽ cho phép điều chỉnh trọng số linh hoạt, từ đó nâng cao độ chính xác trong ước lượng trạng thái và mở rộng khả năng ứng dụng thực tiễn. Phương pháp này không chỉ tăng cường năng lực giám sát và phát hiện bất thường, mà còn hỗ trợ hiệu quả việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo. Trong bối cảnh lưới điện thông minh ngày càng phát triển theo hướng số hóa và linh hoạt, WLS với trọng số thích nghi trở thành một giải pháp thiết yếu nhằm đảm bảo hiệu quả điều hành, nâng cao độ tin cậy và tính ổn định của hệ thống điện hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] F. Schweppe, "Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation," *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 130-135, Jan. 1970.

-
- [2] M. Liu, "State estimation in a smart distribution system," *HKIE Transactions*, vol. 24, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2017.
 - [3] J. A. R. Zhu, "Review of Trends in State Estimation of Power Distribution Networks," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 8, pp. 85- 99, 2020.
 - [4] M. S. N. G. S. Devi and G. Yesuratnam, "Comparison of State Estimation Process on Transmission and Distribution System," in *Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision*, vol. 4, pp. 414 - 423, 2020.
 - [5] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, "WLS distribution system state estimator based on voltages or branch-currents: Accuracy and performance comparison," in *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Minneapolis, USA, 2013, pp. 493 - 498.
 - [6] M.E. Baran and A. W. Kelley, "A branch-current-based state estimation method for distribution systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 483- 491, Feb. 1995.
 - [7] S. Almutairi, Z. Miao and L. Fan, "Performance of Branch-Current Based Distribution System State Estimation," *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, Fargo, ND, USA, 2018, pp.1-6.
 - [8] R. A. Jabr, B. C. Pal, and R. Singh, "Choice of estimator for distribution system state estimation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 7, pp. 666 - 678, Jul. 2009.
 - [9] M. Meriem, S. Omar, C. Bouchra, B. Abdelaziz, E. M. Faissal, and C. Nazha, "Study of State Estimation Using Weighted Least Squares Method," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 8, pp. 55-63, Aug. 2016.
 - [10] A. Abur and A. G. Expósito, *Power system state estimation: theory and implementation*, Marcel Dekker, 2004.
 - [11] S. Durairaj and D. Devaraj, "Reactive power dispatch incorporating thyristor controlled series capacitors using improved genetic algorithm," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 34, no.1B, pp.173-185, April 2009.
 - [12] O. M. Giraldo, C. Ramos-Paja, and L. Grisales-Norena, "An Efficient Methodology for Locating and Sizing PV Generators in Radial Distribution Networks Using a Mixed-Integer Conic Relaxation," *Mathematics*, vol.10, no.15, Jul. 2022, Art. no. 2626.